

## 말뚝의 동적 해석

### 1. 말뚝의 항타시공성

#### 1.1 서 론

#### 이 명 환\*1

말뚝기초는 직접기초와 함께 국내에서 가장 많이 사용되는 기초형식이다. 국내의 말뚝기초 사용물량은 기성콘크리트 말뚝이 약 300만톤/년 정도가 되며 여기에 강관말뚝, 현장타설 콘크리트말뚝 사용물량을 감안하면 이태리, 프랑스 등 선진국의 말뚝시공량을 초과하는 규모가 된다.

말뚝기초의 시공방법에 있어서는 최근 말뚝 항타로 인한 지반진동, 소음 등 건설공해로 인하여 직접항타공법이 감소하고 선굴착공법, 수파기공법 등 저공해 말뚝공법 채택이 급격히 증가하고 있다. 그러나 말뚝의 지지력 및 공사비측면에서는 직접항타공법이 가장 유리한 것으로 알려져 있으며, 따라서 고속도로, 고속철도, 항만시설 등 주요구조물 기초 건설에서는 직항타공법이 주류를 이루고 있다. 또한 건설공해 민원이 제기되지 않는 신도시 건설이나, 공장건설 및 지방에서의 건축공사에서는 직항타 공법이 채택되고 있으며 따라서 직항타공법은 국내의 경우 아직도 가장 많이 채택되는 말뚝시공법으로 판단된다.

이와같은 중요성을 갖는 직항타공법에 의한

말뚝기초의 설계 및 시공에 있어서는 말뚝의 항타시공성(driveability)이 필수적으로 고려되어야 한다.

직항타 시공된 말뚝의 허용지지력은 말뚝의 선단부가 관입되는 지지층의 지반조건에 크게 좌우된다. 특히 우리나라와 같이 비교적 얕은 깊이에서 표토, 퇴적토, 풍화잔류토, 풍화암의 층상을 갖는 지반조건에서는 말뚝지지력의 대부분이 선단지지력에 의존하게 되며, 따라서 말뚝선단부를 지지력이 큰 지지층까지 관입시키는 가능성이 말뚝의 허용지지력 결정에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

그러나 국내에서 이루어지는 대부분의 설계와 이 설계를 바탕으로 하여 실시되는 시공 과정에서는 말뚝의 항타시공성 문제가 고려되지 않고 있다.

이로 인하여 국내의 말뚝설계와 외국의 말뚝설계는 상당한 격차가 나타나게 되며(표 1) 건설시장 개방시 경쟁력 저하는 물론이고, 건설재료의 낭비와 국가예산의 손실 또한 심각한 실정이다.

본고에서는 국내의 설계 및 시공현황을 알아보고, 항타시공성을 적용하여 이를 개선할 수 있는 방안을 제시하였다.

#### 1.2 국내의 설계현황

말뚝의 설계허용지지력은 ①말뚝재료의 허용하중 ②지반의 허용지지력중 낮은 값에 의

\*1 정희원, 파일테크 대표

표 1 국내의 말뚝기초 설계실태

	PC $\phi$ 350	PC $\phi$ 400	강관 $\phi$ 406.4*1	PC $\square$ 350*2
지반의 지지력				
말뚝의 총단면적 (cm <sup>2</sup> )	962.0	1257.0	1297.0	1225.0
극한선단지지력 (ton)	144.3	188.6	194.6	183.8
극한주면마찰력 (ton)	48.1	62.9	64.9	61.3
극한지지력 (ton)	192.4	251.5	259.5	245.1
안전율 고려 (3.0)	64.1	83.8	86.5	81.7
재료의 허용하중				
말뚝의 순단면적 (cm <sup>2</sup> )	582.0	766.0	87.4	1225.0
재료의 허용응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	125.0	125.0	1400.0	125.0
허용하중 (ton)	72.8	95.8	122.4	153.1
실제설계 (ton)	40.0	50.0	80.0	150.0
총단면적당 (kg/cm <sup>2</sup> )	41.6	39.8	61.7	122.4
순단면적당 (kg/cm <sup>2</sup> )	68.7	65.3	915.3	122.4
지반의 지지력 대비 (%)	62.4	59.6	92.5	183.6
재료의 허용하중대비 (%)	54.9	52.2	73.5	98.0

\*1 : 부식고려 2mm 제외

\*2 : 영국의 설계사례

해 결정된다. 그러나 표 1에서도 나타나고 있듯이 국내에서 실시되는 말뚝설계는 이론적인 말뚝재료의 허용하중 또는 지반의 허용지지력의 50~60% 정도에 불과한 실정이다.

실제 국내에서는 거의 모든 지반조사가 표준 관입시험만으로 이루어지고 있으며 말뚝의 설계 허용지지력도 표준관입시험 결과를 이용한 Meyerhof 공식에 의하고 있다.<sup>3)</sup>

Meyerhof 공식은 아래와 같은 식(1)로 표시되며, 국내에서의 검증결과에 의하여 식(2) 및 식(3)이 실무 설계에서 채택되고 있다.<sup>1)</sup>

$$Q_u = q_b A_b + f_s A_s \quad (1)$$

$$q_b = 30 N_b \text{ t/m}^2 \quad (2)$$

$$f_s = 0.2 N \text{ t/m}^2 \quad (3)$$

여기서  $Q_u$  : 말뚝의 극한지지력

$q_b$  : 말뚝의 단위면적당 선단지지력

$f_s$  : 말뚝의 단위면적당 주면마찰력

$N_b$  : 말뚝의 선단부 부근의 N 값

$N$  : 말뚝관입깊이의 평균 N 값

$A_b$  : 말뚝의 선단부 면적

$A_s$  : 말뚝주면면적

식(2) 또는 식(3)의 신뢰도는 말뚝의 설계 허용지지력 산정에 가장 중요한 요소임에 분명하다. 그러나 이보다 중요한 문제는 특정규격의 말뚝을 적절한 항타장비를 사용했을 때 N 값이 어느정도인 지반까지 관입시킬 수 있는가 하는 말뚝의 항타시공 관입성이 함께 고려되어야 한다는 것이다.

그러나 국내의 경우, 이 부분에 관해서는 연구실적이 극히 부진한 상태이며 과거의 경험에 의존하고 있는 실정이다.

표 2에는 국내의 일반적인 설계조건을 식(2) 및 식(3)으로 역해석한 결과를 표시하였다. 여기서 주면마찰력은 전체지지력의 30% 정도인 것으로 가정하였다.

표 2에 나타나고 있는 것처럼 국내에서 일반적으로 시행되고 있는 말뚝항타는 PC 말뚝의 경우 N 값이 30미만인 지층까지, PHC 말뚝은 이보다 약간 높은 35정도까지 항타되며, 강관 말뚝의 경우에도 N 값이 42정도인 지지층까지

표 2 일반적 설계시 말뚝관입능력

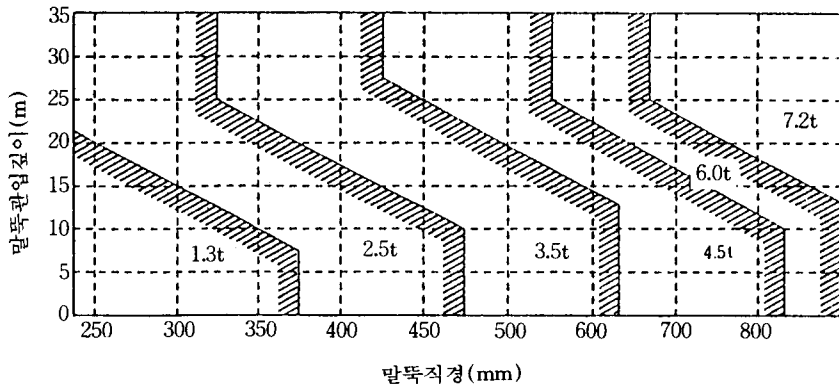
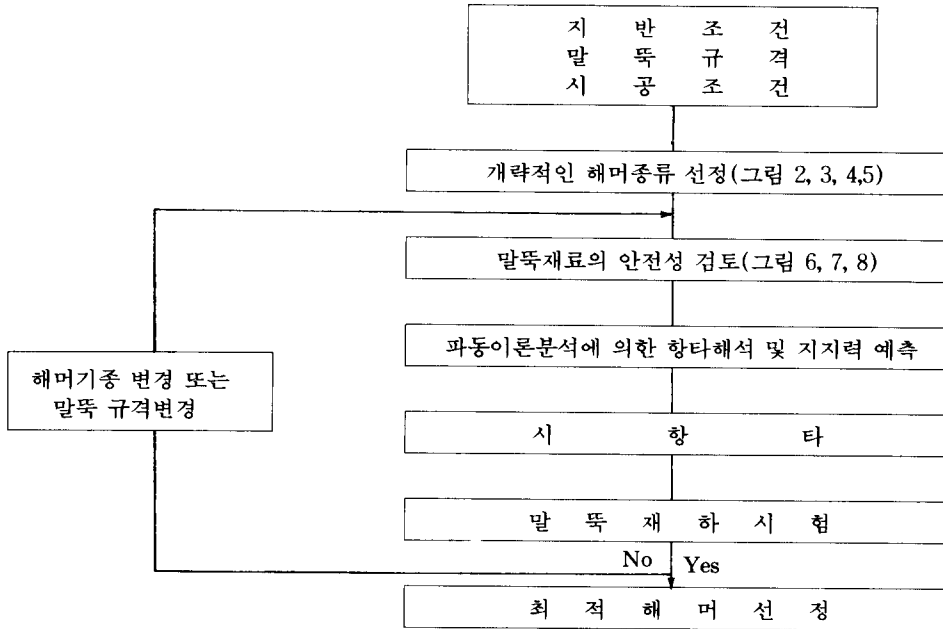
말뚝규격	원심력 PC 말뚝		원심력 PHC 말뚝		강관말뚝		4각말뚝*
	$\phi$ 350mm	$\phi$ 400mm	$\phi$ 350mm	$\phi$ 400mm	$\phi$ 406mm	$\phi$ 508mm	$\square$ 350mm
설계하중 (ton)	40.0	50.0	50.0	60.0	80.0	120.0	150.0
극한주면마찰력 (ton)	36.0	45.0	45.0	54.0	72.0	108.0	135.0
극한선단지지력 (ton)	84.0	105.0	105.0	126.0	168.0	252.0	315.0
선단부면적 (m <sup>2</sup> )	0.0962	0.1257	0.0962	0.1257	0.1295	0.2027	0.1225
한계관입층의 N 값	29.1	27.8	36.4	33.4	43.2	41.4	85.7

\*주 : 4각말뚝은 영국의 설계사례임.

만 시공이 되는 것으로 볼 수 있다.

이는 외국의 경우 N값이 50 이상인 곳까지 향타하여 말뚝재료의 허용하중을 거의 100% 까지 활용하고 있는 것에 비하면 비능률적인 시공이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 1. 디젤해머의 선정



(주) 1. 말뚝길이 10m 이상이며 아래의 조건에 해당될 경우에는 해머의 램중량을 위의 그림에 나타난 것보다 1등급 높은 것을 사용한다.

- ① N값이 30 이상인 모래층 또는 자갈층을 3m 이상 관입하는 경우
- ② N값이 15 이상인 점성토층을 3m 이상 관입하는 경우
- 2. 향타보조장치를 사용할 경우에는 그 길이도 말뚝길이에 포함한다.

그림 2. 개략적인 디젤해머 선정(콘크리트말뚝)

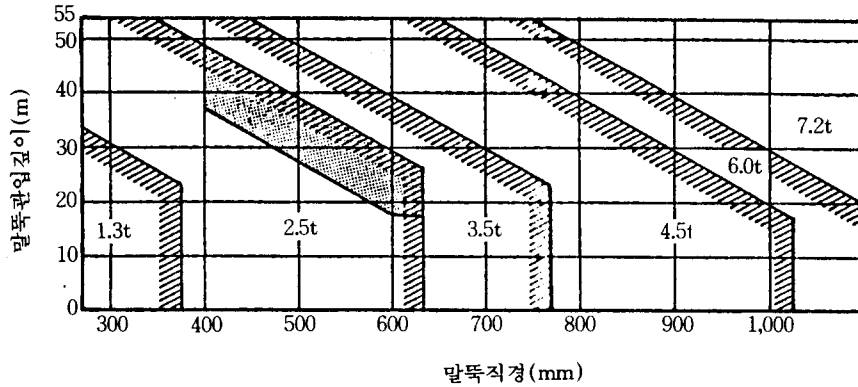
### 1.3 국내의 시공현황

말뚝설계가 완료되면 지반조사 결과로부터 말뚝길이를 결정하고 향타장비를 선정하게 된다. 향타장비의 선정에는 말뚝직경 및 길이가 고려되지만 그림 1에 표시한 과정이 제대로 지켜지는 경우는 거의 없다.

위의 과정을 좀더 상세히 설명하면 디젤해머 사용시 말뚝직경 및 말뚝관입깊이 만을 고려하면, 콘크리트말뚝은 그림 2와 같이, 강관말뚝의 경우에는 그림 3과 같은 선정도표를 활용하

여 개략적인 해머의 램중량을 결정한다.<sup>2)</sup>

항타로 인한 지반진동, 소음 등 건설공해가 문제시되어 유압해머를 사용할 경우, 국내에서는 아직 이에대한 기준이 정립되지는 않았지만



(주) 1. 말뚝길이가 15m 이상이며 아래의 조건에 해당될 경우에는 해머의 램중량을 위의 그림에 나타난 것보다 1등급 높은 것을 사용한다.

- ① N값이 30이상인 모래층 또는 자갈층을 3m이상 관입하는 경우
  - ② N값이 15이상인 점성토층을 3m이상 관입하는 경우
2. 항타보조장치를 사용할 경우에는 그 길이도 말뚝길이에 포함한다.

그림 3. 개략적인 디젤해머 선정(강관말뚝)

일본의 경우에는 콘크리트 말뚝의 경우에는 그림 4와 같은 해머선정이, 강관말뚝의 경우에는 그림 5와 같은 해머선정이 적용되고 있다.

그러나 위와같은 개략적인 해머선정에는 말뚝의 직경과 말뚝관입깊이만이 반영되어 말뚝 두께 및 항타응력은 고려되지 못한다.

말뚝직경 및 말뚝두께에 의한 말뚝의 단면적과 개략적인 항타조건을 감안하여 램중량을 결정하는 데는 그림 6 및 그림 7을 활용할 수 있다.

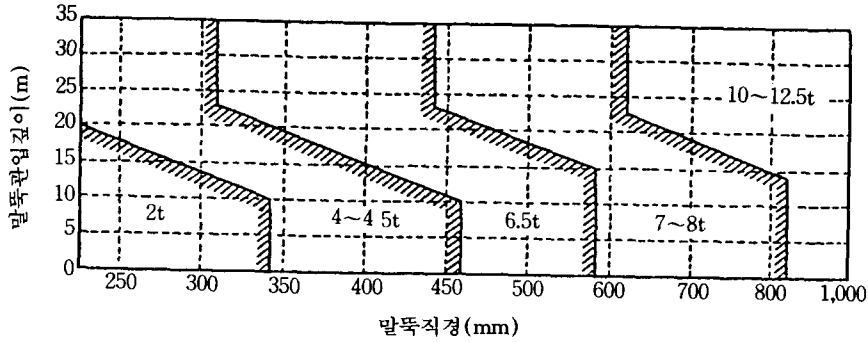
그림 6은 단순히 말뚝단면적과 항타조건만을 고려한 경우이며 그림 7에는 강관말뚝의 두께와 항타조건까지를 고려한 해머선정을 가능케 해준다.

그러나 그림 6 또는 그림 7과 같은 항타응력 고려는 극히 개략적일 수 밖에 없다. 이는 해머의 종류, 말뚝규격 및 지반조건 등 다양한 요소들에 관계되는 항타응력문제를 지나치게 단순화 하였기 때문이다.

이와같이 다양한 요소들을 종합한 항타응력 해석을 하기 위해서는 파동이론을 바탕으로 한 WEAP(wave equation analysis for pile)해석이 필수적이다.

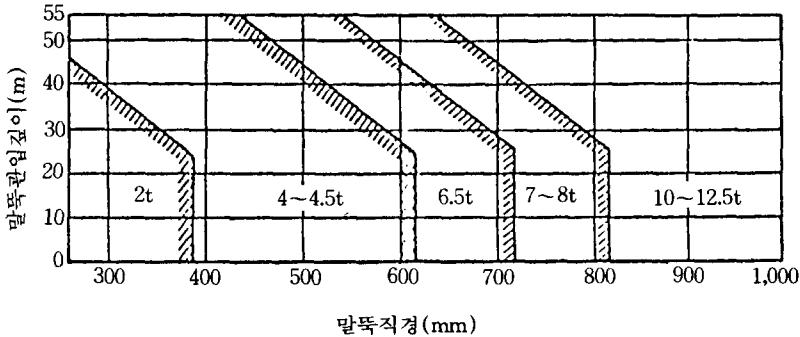
#### 1.4 파동방정식에 의한 말뚝 해석

항타에 의한 말뚝의 파동방정식은 다음과 같다.



- (주) 1. 말뚝길이가 10m 이상이며 아래의 조건에 해당될 경우에는 해머의 램충량을 위의 그림에 나타난 것보다 1등급 높은 것을 사용한다.
- ① N값이 30이상인 모래층 또는 자갈층을 3m이상 관입하는 경우
  - ② N값이 15이상인 점성토층을 3m이상 관입하는 경우
2. 항타보조장치를 사용할 경우에는 그 길이도 말뚝길이에 포함한다.

그림 4. 개략적인 유압해머 선정(콘크리트말뚝)



- (주) 1. 말뚝길이가 15m 이상이며 아래의 조건에 해당될 경우에는 해머의 램충량을 위의 그림에 나타난 것보다 1등급 높은 것을 사용한다.
- ① N값이 30이상인 모래층 또는 자갈층을 3m이상 관입하는 경우
  - ② N값이 15이상인 점성토층을 3m이상 관입하는 경우
2. 항타보조장치를 사용할 경우에는 그 길이도 말뚝길이에 포함한다.

그림 5. 개략적인 유압해머 선정(강관말뚝)

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = \frac{E_p}{\rho} \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \pm R \quad (4)$$

$\rho$  : 말뚝의 밀도(kg/cm<sup>3</sup>)

t : 시간

여기에서, D : 말뚝의 축방향 변위(cm)

x : 진행파의 위치

$E_p$  : 말뚝의 탄성계수(kg/cm<sup>2</sup>)

R : 흙의 저항치

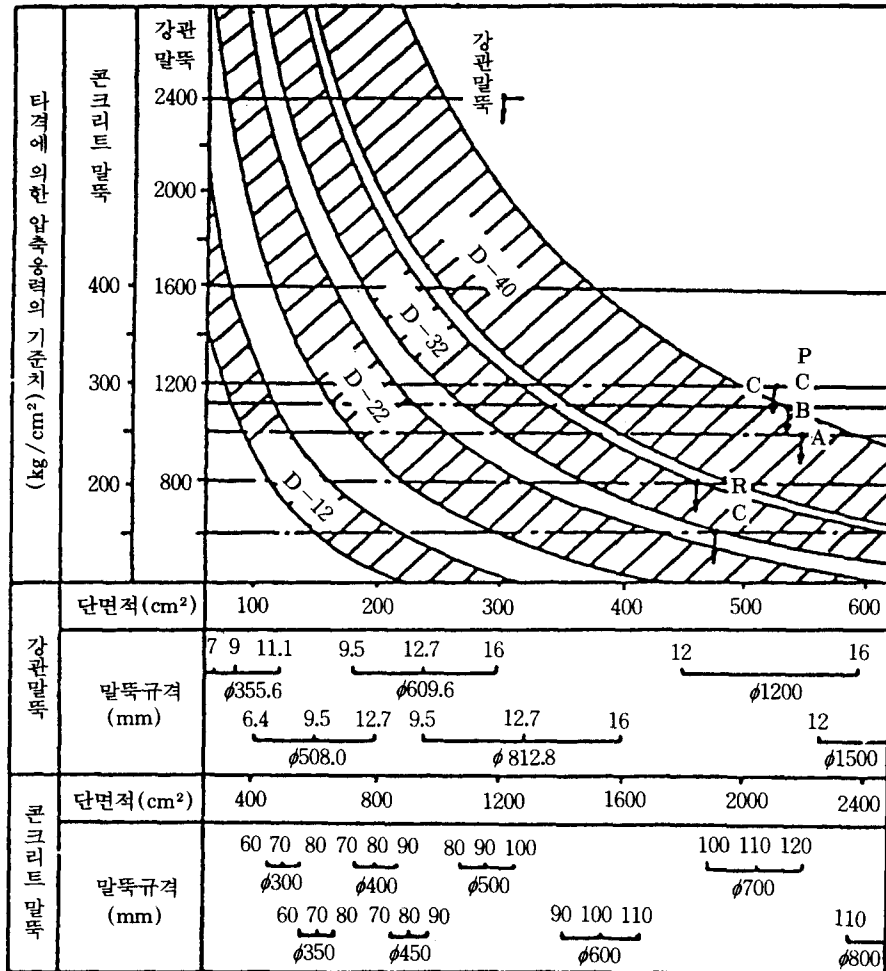


그림 6. 항타응력을 고려한 디젤해머 선정 (I)

이 파동방정식을 이용한 말뚝의 설계는 말뚝에서의 응력의 변화로부터 말뚝의 변위와 시간 그리고 요소위치 사이의 관계를 결정하기 위해 실제의 말뚝을 그림 8과 같이 유한한 요소로 나누어서 항타에 의한 충격파의 전달과정을 각 요소마다 시간별로 표시하여 변위와 응력등을 계산하고 극한지지력에 따르는 최종 항타관입량(set)등을 컴퓨터를 사용하여 해석하는 소위 수치해석 방법이다.

이와 같은 파동방정식을 사용한 수치해석에 필요한 입력자료들을 항타장비, 지반조건, 말뚝별로 기술하여 보면 다음과 같다.

(1) 항타장비

- ① 램의 낙하고 및 중량
- ② Cap의 중량
- ③ Cap block의 stiffness 값
- ④ Cap의 반발계수

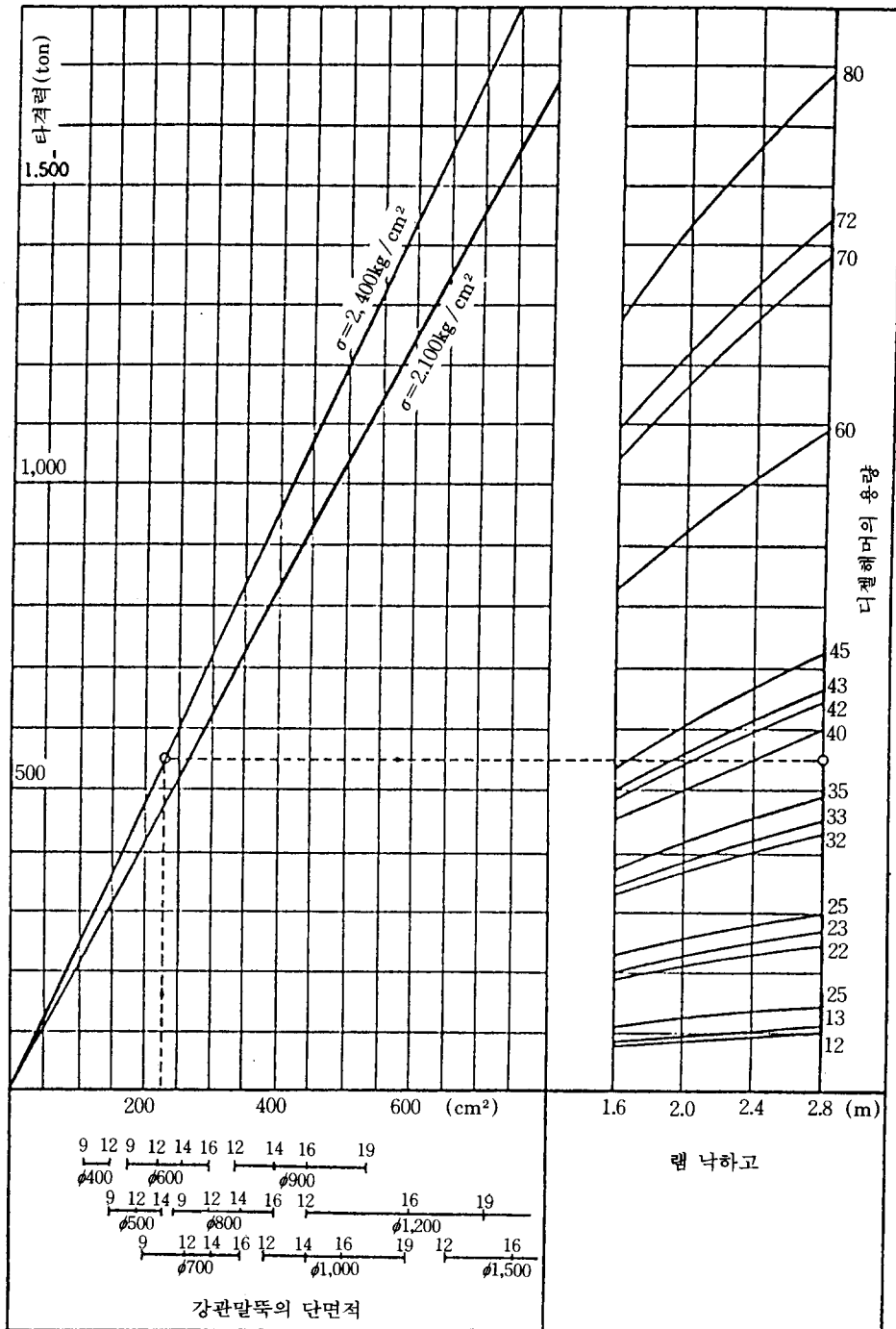


그림 7. 항타용력을 고려한 다셀해머 선정(II)

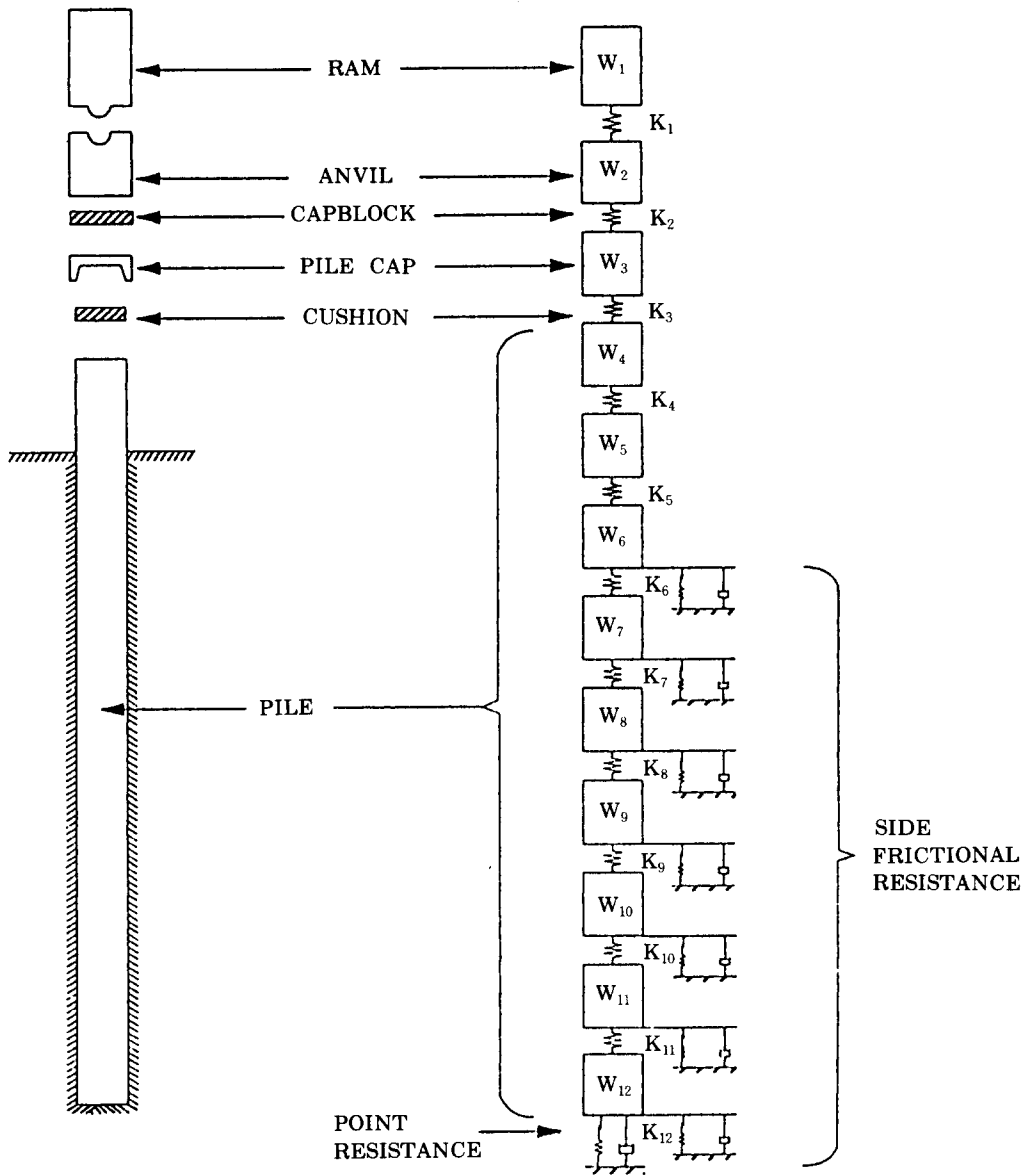


그림 8. 파동방정식의 수치해석 기본모델

- ⑤ Cushion의 stiffness 값
- ⑥ 해머 효율
- (2) 지반조건
- ① 지반에 묻힌 말뚝 길이

- ② 토질 주상도
- ③ 지반의 탄성 변형량(quake)
- ④ 흙의 damping 값
- ⑤ 말뚝 주변 마찰력의 분포 형태 및 극한 지



지력에 대한 주면 마찰력의 비율

(3) 말뚝

- ① 총 길이 및 단면적    ② 말뚝의 단위중량
- ③ 말뚝의 탄성계수    ④ Cushion의 반발계수

상기 입력자료들을 사용하여 컴퓨터 프로그램을 이용하여 해석을 하게 되며 현재 실무에서 가장 많이 사용되고 있는 프로그램은 GRL WEAP(GRL wave equation analysis for pile)으로 미국의 케이스 웨스턴 대학에서 개발된 것이다.

GRL WEAP 등의 파동방정식을 이용한 프로그램으로 얻을 수 있는 결과는 다음과 같다.

(1) 극한지지력과 단위근입에 필요한 항타수의 관계

본 파동방정식을 이용하여 말뚝설계를 할 때, 극한지지력 값을 구할 수 있으며 이때 해석 결과로 나오는 것이 blow/penetration이다. 따라서 set 을 어느 값으로 가정할 때, 이에 상응한 극한지지력을 유추할 수 있게 된다.

(2) 말뚝에 걸리는 항타응력

본 파동방정식에 의한 해석으로 얻을 수 있는 결과 중 하나가 항타시 말뚝에 걸리는 응력으로 말뚝자체의 허용응력과 비교하여 과응력 문제를 검토할 수 있다.

실제로 말뚝의 항타시공성을 판단할 때는 항타수와 항타응력 모두를 검토하여야 한다. 그러나 이는 말뚝재료에 따라 우선적으로 고려되어야 하는 요소가 상이하게 나타날 수도 있다.

콘크리트 말뚝의 경우 최대허용 항타응력은 말뚝재료의 압축강도의 0.6 배를 적용하고 강관 말뚝의 경우에는 여러가지 견해가 있으나 미국의 FHWA 에서 공식적으로 추천한 값  $0.9\sigma_y$  ( $\sigma_y$  = 강관의 항복응력)를 사용하는 것이 적합하다.

그러나 항타응력이 재료의 허용값 범위이내 일 지라도 말뚝관입에 필요한 항타수(1m 깊이 관입에 필요한 항타수, BPM)가 지나치게 큰

값이 되면 실용적인 시공이 불가능하다. 실용적인 시공기준은 여러가지 이견이 있을 수 있지만 PC 말뚝은 BPM=120(최종타격당 관입량=8mm), PHC 말뚝은 BPM=200(최종타격당 관입량=5mm), 강관말뚝은 BPM=500(최종타격당 관입량=2mm) 이상이 되면 시공이 무리한 것으로 판단할 수 있다.

1.5 파동방정식 해석의 적용

앞에서 설명한 내용을 보다 구체적으로 분석하기 위하여 국내의 실제 지반조건에서 말뚝기초의 항타시공성을 검토해 보았다. 본 검토에서는 국내의 전형적인 지반조건에 일반적으로 많이 사용되는 PC 말뚝, PHC 말뚝 및 강관말뚝을 항타시공하는 경우를 분석하였다.

그림 9는 표토, 풍화토, 풍화암으로 구성된 전형적인 지반조건을 보여준다. 이와 같은 지반에 직경 350mm 와 직경 400mm 의 PC 말뚝과 PHC 말뚝을 항타 시공하는 경우 말뚝의 허용지지력은 시공장비 선정에 따라 크게 상이하다.

그림 9와 같은 지반에 직경 350mm PC 말뚝을 K25 디젤해머로 항타시공하는 경우의 WEAP 해석결과는 그림 10과 같다.

본 분석에서는 말뚝의 주면마찰력이 전체 지지력의 30%인 것으로 가정하였으며 PC 말뚝의 최대허용항타응력은 압축강도의 60%인  $300\text{kg/cm}^2$  를 적용하였다.

분석결과 항타회수가 BPM=76(최종타격당 관입량=13.2mm)일 때 항타응력이  $300\text{kg/cm}^2$  가 되며, 따라서 그 이상의 관입은 과응력(overstress)을 유발시킨다.

결국 최대로 항타할 경우 기대할 수 있는 말뚝의 극한지지력은 96ton 정도가 되며 허용설계하중은 32ton이 된다. 이와 같은 설계하중은 국내에서 일반적으로 적용되는 40ton에 미치지 못하며, 이를 개선하기 위해서는 PHC 말뚝을 사용하던지 항타장비를 램중량이 낮은 K13급으로 변경하는 것이 필요하다.

표 3에는 이와 같은 지반조건에서 PC, PHC

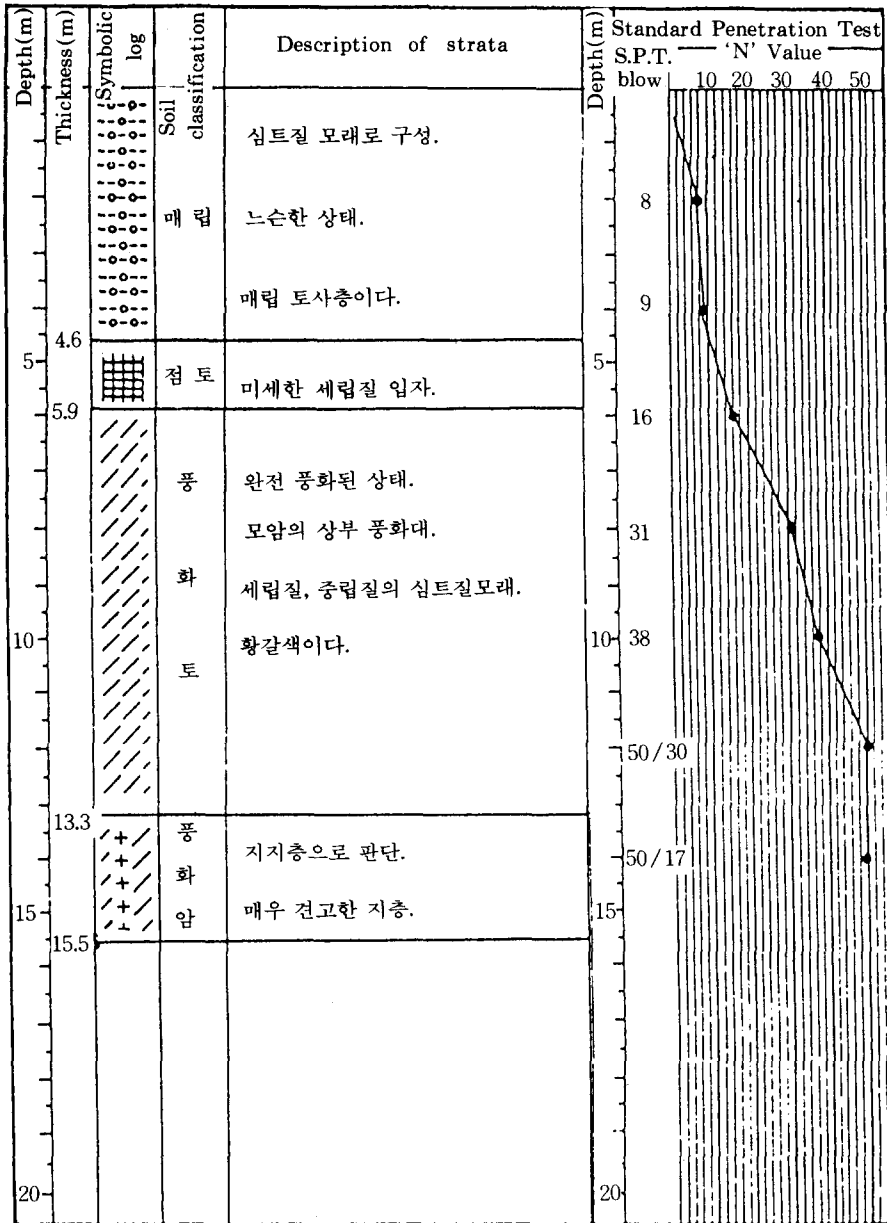


그림 9. 지반조건 I

말뚝을 직경 350mm 및 400mm로 변화시키고 여기에 항타장비를 K13, K25, K35의 3가지를 적용하는 경우 기대할 수 있는 말뚝의 설계하중을 계산해 보았다.

표 3에서 나타나고 있는 바와 같이 같은 지반조건에서도 말뚝종류, 해머종류에 따라 말뚝의 허용지지력이 상이하게 나타남을 알 수 있다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke	Energy (KN·m)
1	294.0	20.355	0.000	17.0	1.24	30.81
2	588.0	24.570	0.668	41.6	1.49	24.74
3	882.0	27.984	0.483	73.2	1.69	21.81
4	1176.0	32.544	0.714	107.6	1.84	20.30
5	1274.0	34.128	0.975	121.4	1.92	20.17
6	1372.0	35.468	1.070	139.7	1.96	19.76
7	1470.0	36.325	1.131	166.1	1.98	18.95
8	1764.0	39.438	2.537	276.2	2.12	18.21
9	2058.0	41.230	3.332	539.0	2.18	17.93
10	2352.0	42.519	3.421	1257.3	2.29	17.96

강관말뚝의 경우에서도 사정은 유사하다. 그림 11과 같은 지반에  $\phi 406\text{mm} \times 9\text{mm}(t)$  및  $\phi 508\text{mm} \times 12\text{mm}(t)$ 의 강관말뚝을 K25, K35 및 K45 디젤해머를 사용하여 항타한 경우의 WEAP 분석결과를 표 4에 나타내었다. 본 분석에서는 말뚝의 주변마찰력이 전체지지력의 40%인 경우로 가정하였다.

### 1.6 결 론

본고에서는 항타시공되는 말뚝에서 항타시공성의 영향을 대표적인 지반조건을 예로하여

PC350(K25)

GRLWEAP(TM) Version 1. 993-1 94 05 31

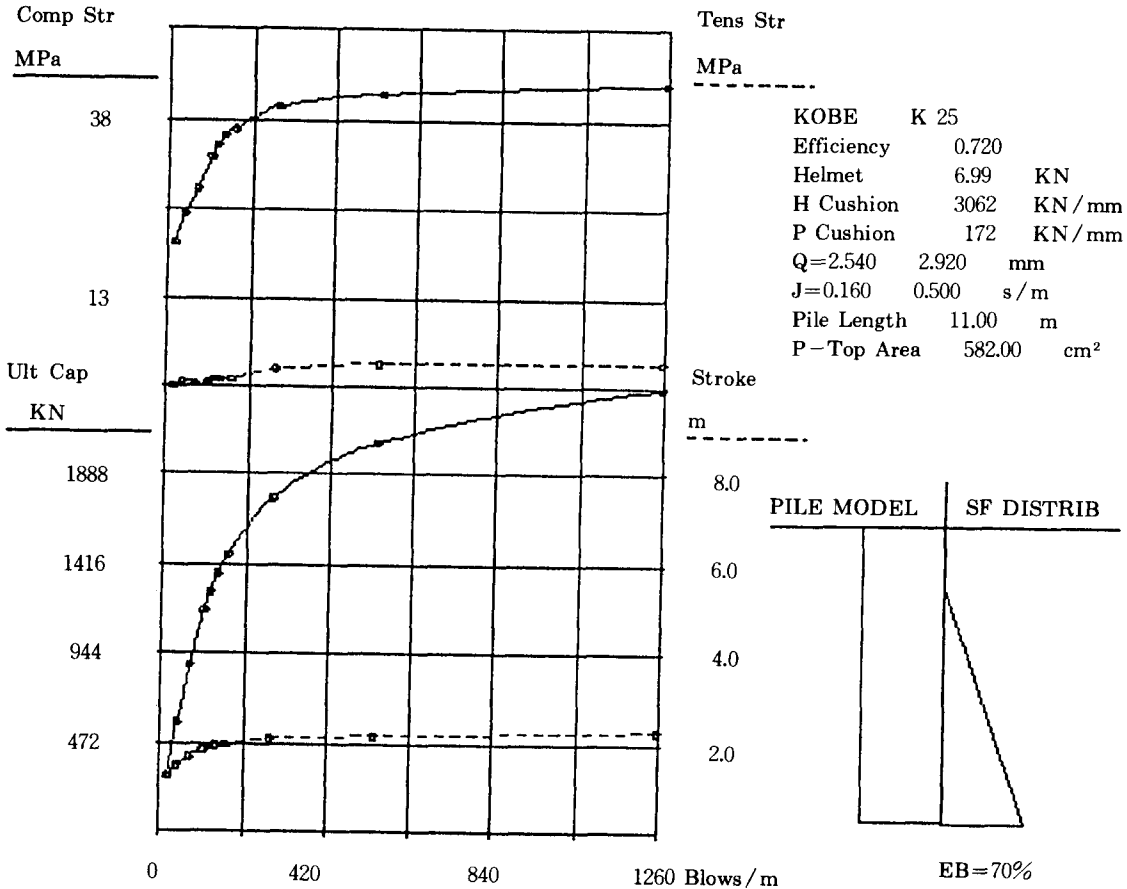


그림 10. WEAP해석결과예

표 3 말뚝종류, 항타장비 변화에 따른 설계하중(콘크리트말뚝)

말뚝규격	지지력 결정요소			설계하중 (ton)	비고
	시공조건	항타장비	항타회수		
PC $\phi$ 350	K13	245	200	30	항타회수 과다
	K25	300	76	32	과응력 발생
	K35	300	26	17	과응력 발생
PHC $\phi$ 350	K13	245	200	30	항타회수 과다
	K25	382	200	52	항타회수 과다
	K35	478	200	71	항타회수 과다
PC $\phi$ 400	K13	153	200	33	항타회수 과다
	K25	300	158	51	과응력 발생
	K35	300	63	40	과응력 발생
PHC $\phi$ 400	K13	153	200	33	항타회수 과다
	K25	323	200	57	항타회수 과다
	K35	420	200	77	항타회수 과다

표 4 말뚝종류, 항타장비 변화에 따른 설계하중(강관말뚝)

말뚝규격	지지력 결정요소			설계하중 (ton)	비고
	시공조건	항타장비	항타회수		
$\phi$ 406 $\times$ 9	K25	2520	454	83.0	과응력 발생
	K35	2520	99	63.0	과응력 발생
	K45	2520	68	58.0	과응력 발생
	K25	1980	500	88.0	항타회수 증가
$\phi$ 508 $\times$ 12	K35	2356	500	115.0	항타회수 증가
	K45	2520	229	107.0	과응력 발생

알아보았다.

본고에서 설명한 내용은 특정 지반조건에 대한 것이다. 따라서 해당 지반조건에 대하여는 별도의 분석이 요구된다.

그러나 본고에서 알아본 바와 같이 말뚝의 설계하중은 항타시공성을 고려한 적절한 장비 선정을 할 경우 설계수준을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대한다.

반대로 적절치 못한 설계 및 시공계획은 지지력 미달을 유발하게 되며 나아가 축조되는 구조물의 안전을 위협한다.

결론적으로 향후 국내의 기초 건설기술 수준 향상을 위해서는 항타시공성 검토가 필수적이며, PDA 측정을 통하여 그 신뢰도를 제고할 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

1. 이명환, 윤성진(1992), "말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교", 한국지반공학회 '92년 봄학술 발표회 논문집
2. 日本道路協會(1993), "杭基礎施工便覽"
3. Meyerhof, G. G.(1956), "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.82, SM 1, pp. 1-19.

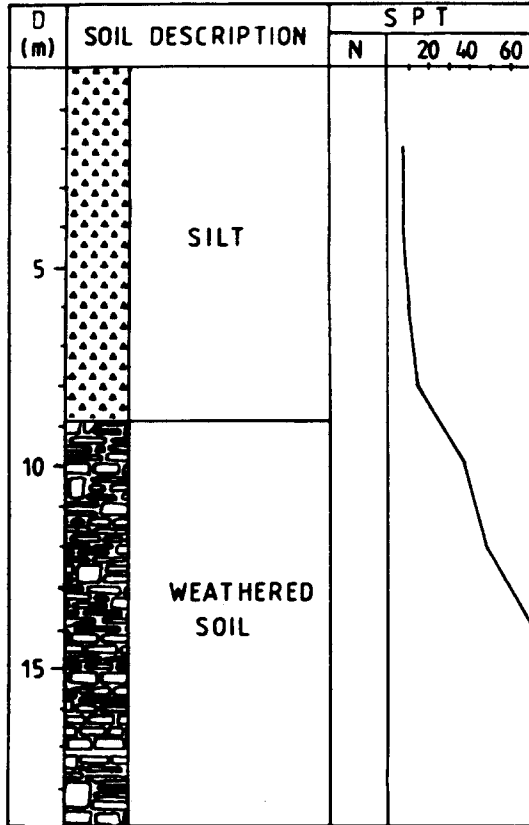


그림 11. 지반조건 II

## 2. Pile Driving Analyzer의 기본 원리

### 2.1 말뚝의 항타해석

이 인 모\*1  
최 유 중\*2

항타과정의 수치적 해법인 파동 방정식에 의한 해석법은 Smith(1960)에 의해 최초로 소개되었다. 이 해석법에서는 항타기, 쿠션, 헬멧, 말뚝을 스프링으로 연결된 일련의 Rigid Mass로 표현하였으며, 말뚝-흙의 거동은 정적 저항을 위해 탄소성 스프링을, 동적 저항을 위해 선형 감쇄기를 각각의 말뚝 요소에 연결하여 표현하였다. 이들 정적, 동적 저항 모델 중 중요한 Parameter는 Quake, Damping, 흙의 정적 저항력이다. 그 이후 파동방정식에 의한 항타해석용 프로그램이 계속 개선되어 왔다. 파동 방정식에 의한 항타해석은 동적 지지력 공식에 의한 항타관리 보다 훨씬 우월하지만, 항타로 인해 말뚝에 전달되는 가속도, 속도, 힘, 변위 등을 항타기, 쿠션, 헬멧의 모델링으로부터 계산하므로 항타기의 실제 거동과는 상이한 결과를 가져올 수 있다. 따라서 파동 방정식에 의한 항타 해석은 말뚝의 극한 지지력 추정보다는 Parametric Study를 통한 항타장비 및 말뚝의 효율적인 선택을 위해 사용되는 것이 적절하다.

1964년 Goble 교수에 의해 Case Western Reserve University에서 시작된 연구는 항타 해석을 통해 말뚝의 지지력을 예측할 수 있는 Case 방법(Goble 등, 1975)을 개발하였다. Case 방법을 이용하기 위해서는 항타시 말뚝두부

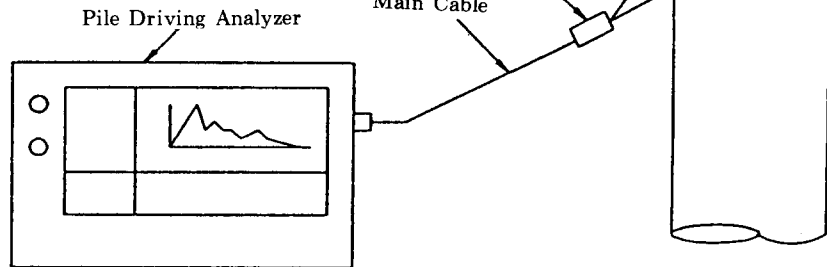


그림 1. 말뚝 항타 분석기의 구성  
(Schematic of PDA Set up)

에서 힘과 속도를 측정하여야 하며, 이들 측정치를 이용하여 항타기 및 Driving System의 거동(Likins, 1978), 말뚝의 항타응력(Goble 등, 1980), 말뚝의 건전도(Rausche 등, 1978), 말뚝의 지지력(Rausche 등, 1985) 평가가 가능하다. 이들 분석결과는 항타즉시 말뚝 항타 분석기(PDA: Pile Driving Analyzer)의 화면을 통해 관찰할 수 있다. 말뚝 항타 분석기는 WEAP 해석과는 달리 말뚝의 두부에서 측정된 결과를 이용하므로 항타장비 및 항타시스템의 모델링으로 인한 오차를 제거하였다.

### 2.2 구성 장비

말뚝 항타 분석기(PDA: Pile Driving Analyzer) 및 측정장치들은 현장에서 일상적인 시험으로 쉽게 사용할 수 있도록 개발된 것으로 그림 1과 같이 구성되어 있다. 두쌍의 변형계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)는 말뚝의 두부에 볼트로 고정되며 측정된 말뚝의 변형과 가속도는 힘과 속도로 변

\*1 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 부교수

\*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정

환되어 말뚝 향타 분석기의 화면에 향타와 동시에 나타난다. 변형계는 4개의 Resistance Foil Gages를 부착한 Frame으로 재사용이 가능하며, 가속도계는 Quartz Crystal로 구성된 Piezoelectric 방식이 보통 사용된다. 향타시 편타로 인해 동일 위치의 단면에 다른 크기의 압축력 또는 변위가 발생하는 것을 감지하고자 말뚝 주면의 180° 방향으로 한쌍씩의 변형계와 가속도계를 부착한다.

말뚝 향타 분석기는 변형계와 가속도계로부터 측정된 아날로그 신호에 대해 Signal Conditioning을 실시하며, A/D 변환기를 통해 힘과 속도가 디지털 데이터로 변환된다. 이와 함께 Case 방법으로 추정된 각종 계산치를 힘과 속도와 함께 말뚝 향타 분석기 화면에 보여준다. 말뚝 향타분석기는 약 36가지의 Quantity를 계산하며 이들중 중요한 것들이 표 1에 나열되어 있다.

표 1 중요한 향타분석기 계산 출력치(Pile Dynamics, Inc, 1993)

출력치	내 용
CSX (FMX)	Gauge 위치에서의 최대 압축 응력(최대 압축력)
CSB (CFB)	말뚝 선단부에서의 최대 압축 응력(최대 압축력)
TSX (CTX)	말뚝에 작용하는 최대 인장 응력(최대 인장력)
DMX	Gauge 위치에서의 최대 변위
EMX	Gauge 위치에서의 최대 향타 에너지
ETR	에너지 전달률
BTA	말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도 지수
RTL	말뚝의 Total Resistance(정적+동적)
RSP (RP#)	Case 방법에 의한 정적 극한 지지력 (RSP w/JC=0.#)
RMX (RX#)	Case 방법에 의한 최대 정적 극한 지지력(RMX w/JC=0.#)
RMN	Case 방법에 의한 최소 정적 극한 지지력
RSU (RU#)	Early unloading을 보정한 정적 극한 지지력(RSU w/JC=0.#)

RAU	Case 방법에 의한 선단 지지 말뚝의 극한 지지력
-----	------------------------------

### 2.3 Proportionality

향타시 말뚝두부에 압축변형과 압축력이 발생한다. 이 힘은 다시 말뚝을 따라 아래방향으로 전달되면서 압축변형을 발생시킨다. 이때 압축변형으로 인하여 말뚝내에 변위가 발생하며, 말뚝내 어느 한 요소의 변위 속도를 Particle Velocity(V)라고 한다. 압축파 자체는 Wave Speed(C)로 말뚝을 통해 전파된다.

그림 2에 보이는 바와 같이 시간  $\Delta t$  동안 압축파가  $\Delta L = (\Delta t) \cdot C$ 의 거리를 이동하면 말뚝내의 A점에서는  $\delta$ 만큼의 변위가 발생한다. 변위  $\delta$ 로 인한 말뚝의 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{\Delta t \cdot C} \quad (1)$$

이때 A점의 속도는

$$V = \frac{\delta}{\Delta t} \quad (2)$$

이고, 식(1)과 (2)로부터 다음식이 얻어진다.

$$\varepsilon = \frac{V}{C} \quad (3)$$

식 (3)의 양변에 말뚝의 탄성계수(E)와 단면적(A)를 곱하면 식 (4)가 얻어진다.

$$F = \frac{EA}{C} V \quad (4)$$

식(4)는 향타분석을 위한 측정의 기본이 되는 식으로, 비례계수 ( $EA/C$ )는 말뚝의 Impedance라고 한다. 뒷식으로부터 말뚝내 어느 한점에서의 힘은 동일한 점에서의 Particle Velocity에 비례한다는 것을 알 수 있으며, 말뚝 향타 분석기에서 측정된 속도에 말뚝의 Impedance를 곱한 값은 측정된 힘과 같아야 한다. 식 (4)는 측정점에 Reflection Wave가 도

달하지 않는 한 유효하며, 주변 마찰이나 선단 지지로 인해 Wave가 반사되어 측정점에 도달하면 F는 증가하고 (EAV/C)는 감소하게 되어 식 (4)는 성립하지 않게 된다. 일반적으로 말뚝 항타 분석기에 측정된 속도가 최대값에 도달할 때까지는 힘과 속도가 비례한다.

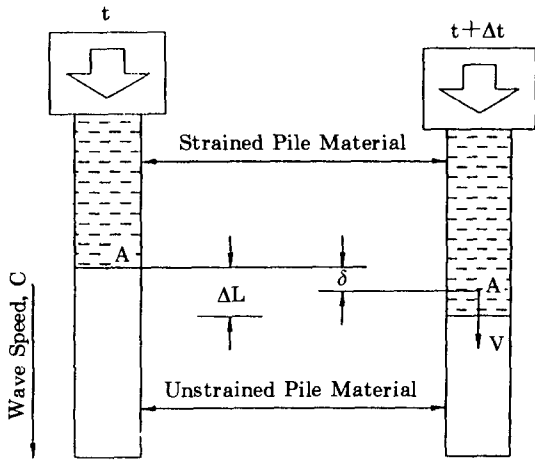


그림 2. Proportionality ( $F=AEV/C$ )

## 2.4 Case 방법

말뚝 항타 분석기는 1차원 파동 전달이론으로부터 전체 저항(total driving resistance)과 정적 저항(static resistance)을 계산한다. (Rausche 등, 1985; GRL, 1993). Case 방법의 기본이 되는 항타 저항력은 Rausche 등 (1985)에 의해 다음과 같이 제안되었다.

$$RTL = \frac{1}{2} [FT1 + FT2] + \frac{1}{2} \frac{AE}{C} [VT1 - VT2] \quad (5)$$

여기서

RTL : 전체 저항력

FT1, FT2 : 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 힘

VT1, VT2 : 시간 t1과 t2에 말뚝두부에서 측정된 속도

AE/C : 말뚝의 Impedance

일반적으로 시간 t1은 측정된 속도가 최대인 시간으로 하며 시간 t2는 시간 t1으로부터 (2L/C)가 경과한 시간을 말한다.

항타시 말뚝의 전체 저항력, RTL,은 정적 저항력과 Damping으로 인한 동적 저항력으로 구성된다. Case 방법에서는 동적 저항력을 Case Damping Factor( $J_c$ ), 말뚝의 Impedance(EA/C), 말뚝 선단에서의 Particle Velocity( $V_t$ )의 곱으로 정의하고 전체 저항력으로부터 동적 저항력을 제거함으로써 말뚝의 정적 지지력을 추정한다. (Rausche 등, 1985)

$$\begin{aligned} RSP &= RTL - J_c \frac{AE}{C} V_t \\ &= RTL - J_c [VT1 \left( \frac{AE}{C} \right) + FT1 - RTL] \quad (6) \\ &= \frac{1}{2} (1 - J_c) [FT1 + VT1 \left( \frac{AE}{C} \right)] + \frac{1}{2} (1 + J_c) \\ &\quad [FT2 - VT2 \left( \frac{AE}{C} \right)] \end{aligned}$$

Case 방법은 항타와 동시에 말뚝의 예상 지지력을 계산하므로 항타관리에 매우 편리하지만, 말뚝의 실제 지지력 추정시 Case Damping Factor,  $J_c$ ,를 경험적으로 가정하여야 하고 FT와 VT의 계산을 위해 시간 t1을 선택하여야 하는 등의 오차 유발 요인을 포함하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 개발된 것이 CAPWAP(case pile wave analysis program) 방법이다.

## 2.5 CAPWAP 방법

CAPWAP 방법은 Case Western Reserve University에서 Rausche(1970)에 의해 최초로 개발되었으며 말뚝 항타 분석기로 얻은 힘과 속도의 기록을 이용해 시행오차법으로 경계조건(말뚝 지지력, 흙의 저항 분포, Quake 및 Damping 특성)을 결정한다. 이 방법에서는 말뚝을 압축파의 이동 시간이 동일한 연속적인 Segment로 모델링하고, 가정된 경계조건을 이용하여 계산된 파를 측정된 파와 비교하면서 두 파형이 어느정도 일치될 때의 경계조건을

결정한다. 입력치로 사용되는 말뚝두부의 거동은 힘, Wave Down, 속도 등이며 이 경우 계산되는 출력치는 각각 속도, Wave Up, 힘이 된다. 계산된 파와 측정파를 일치시키기 위한 반복작업시 조정되는 Modeling Parameter 중 대표적인 것은 Quake, Unloading Quake, 흙 및 말뚝의 Damping, Unloading Level, Reloading Level, Radiation Damping을 위한 Parameter, Plug Mass, 극한 지지력, 흙의 저항 분포 등이다. CAPWAP은 위에서 계산된 경계조건을 이용, 정적 재하 시험을 모사하여 말뚝의 두부에 하중을 작용시켜 말뚝의 관입과 이에 소요되는 흙의 정적 저항력의 관계를 얻을 수 있으며, 주변 마찰력의 분포를 제시한다.

그러나 CAPWAP 해석법은 다음과 같은 문제점도 가지고 있으므로 유의하여 사용해야 한다. 첫째, 항타로 인한 말뚝의 변위가 충분하지 않으면 CAPWAP은 지지력을 과소 평가하는 경향이 있다. 일반적으로 최소 2mm 이상의 최종관입이 발생하여야 적절히 지지력을 예측한다. 둘째, 어떤 입력파형(힘, Wave Down, 속도)을 사용하느냐에 따라 추정되는 경계조건에 약간의 차이가 있다. 따라서 CAPWAP에 의한 경계조건은 과연 Unique Solution인가 하는 의문이 있으며, 사용자의 해석 및 숙련 정도에 따라 결과가 다를 수도 있다. 셋째, CAPWAP 해석 결과는 말뚝 항타 분석기로 측정된 시점의 말뚝 지지력을 예측하므로 Set-Up이나 Relaxation에 의한 지지력 증감은 기술자에 의해 판단되어야 한다.

### 참 고 문 헌

1. Goble, G. G., Likins, G. E., and Rausche, F., "Bearing Capacity of Piles From Dynamic Measurements-Final Report," Dept. of Civil Engineering, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1975.
2. Goble, G. G., Rausche, F., and Likins, G. E.,

"The Analysis of Pile Driving, A State-of-the-Art," The 1st Seminar on the Application of Stress Wave Theory on Piles, Stockholm, Sweden, 1980.

3. Goble Rausche Likins and Associates, Inc., "CAPWAP-Case Pile Wave Analysis Program," Cleveland, Ohio, 1993.
4. Likins, G. E., "Evaluating the Performance of Pile Driving Hammers," 4th PDA User's Seminar, Amsterdam, Holland, 1982.
5. Pile Dynamics, Inc., "PDA-Pile Driving Analyzer," Cleveland, Ohio, 1993.
6. Rausche, F., "Soil Response from Dynamic Analysis and Measurements on Piles," Ph.D. Thesis, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio, 1970.
7. Rausche, F., and Goble, G. G., "Determination of Pile Damage by Top Measurements," Behavior of Deep Foundations, ASTM Symposium, Boston, Massachusetts, 1978.
8. Rausche, F., Goble, G. G., and Likins, G. E., "Dynamic Determination of Pile Capacity," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1985.
9. Smith, E. A. L., "Pile Driving Analysis by the Wave Equation," Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol. 86, 1960, pp.36-61.

## 3. Pile Driving Analyzer 적용 사례

### 3.1 개 요

이 우 진\*1  
최 유 중\*2

최근 급속한 산업발달과 더불어 경제규모가 확대됨에 따라 각종 건설을 위한 부지 확보의 어려움으로 인하여 열악한 지반 조건에서의 건설활동이 증가하는 추세로 이는 깊은 기초의 수요를 더욱 가속화 시킬 전망이다. 그러나 대부분의 말뚝시공 현장은 항타장비의 선정 및

\*1 정회원, 삼성건설 기술연구소

\*2 고려대학교 토목환경공학과 석사과정



항타 시공 관리의 어려움으로 인하여 많은 문제점을 내포하고 있는 실정이다.

말뚝 항타 분석기(PDA; pile driving analyzer)는 항타로 인한 말뚝의 변위와 가속도를 분석하여 항타기의 효율적인 작동여부, 말뚝에 작용하는 압축력 및 인장력, 말뚝의 손상여부, Case 방법에 의한 예상 지지력 등을 항타즉시 출력한다. 따라서 말뚝이 손상되지 않는 범위내에서 소정의 지지력을 얻을 수 있도록 항타관리가 가능하며 항타기의 효율 및 적절성을 판단하여 항타장비 및 항타시스템, 말뚝의 적절한 조합을 유도할 수 있다. 말뚝 항타 분석기는 파동방정식을 이용한 항타해석(Wave Equation Analysis of Pile Driving)과는 달리 말뚝 두부에서 측정된 변위와 가속도로 부터 구한 힘과 속도를 입력치로 사용하기 때문에 항타기의 모델링 또는 효율의 추정으로 부터 생기는 오차를 제거하였다. CAPWAP(Case Pile Wave Analysis Program)은 말뚝 항타 분석기로 측정된 힘과 속도를 Wave Matching Technique으로 분석하여, 말뚝의 극한 지지력, Quake 및 Damping 등을 추정하며, 이들을 이용하여 정적 재하 시험을 모사한 하중-변위 곡선, 주변 마찰력의 분포 및 크기, 선단 지지력 등을 예측한다.

### 3.2 사례연구

본 연구에서는 말뚝 항타 분석기를 이용하여 항타관리 및 지지력 예측을 실시하였던 현장들 중 국내현장 5개소에 대한 결과를 소개하고자 한다. 각 현장의 말뚝종류 및 연구 대상은 표 1과 같다.

표 1 각 현장과 말뚝에 대한 소개 및 연구대상

현장명	말뚝	항타기	설계하중	연구대상
I 현장	PC $\phi$ 400 T = 7.5cm	유압햄머 NH-40	50 Ton	말뚝 손상 사례 항타시스템의 효율
P 현장	PC $\phi$ 350 T = 6.5cm	낙하추	44 Ton	SIP 공법 주변 마찰력

H 현장	Steel $\phi$ 609.6 T = 1.2cm	디젤햄머 K-35	140 Ton	정재하 시험과 비교
D 현장	Steel $\phi$ 609.6 T = 1.2cm	디젤햄머 K-35	140 Ton	Preignition
J 현장	Steel $\phi$ 508 T = 1.2cm	디젤햄머 K-25	80 Ton	정재하시험과 비교 항타시스템의 효율

#### 1) I 현장

본 현장은 아파트 기초 현장으로서 지반은 깊이 5~6m까지는 매립된 실트질 점토층이고 그 이하로는 풍화암층이다. 말뚝은 PC 말뚝으로 외경이 40.0cm, 두께는 7.5cm, 최종관입깊이는 6m로 매립층과 풍화암층 경계부에 얹혀져 있다. 항타기는 유압 햄머(NH-40)를 사용하였고 초기 항타시에 시험을 실시하였다.

현장에 반입된 PC 말뚝을 말뚝 건전도 시험기(Pile Integrity Tester)로 시험한 결과 압축파의 속도는 약 3900~4100m/sec로 추정되었으나 항타중 말뚝 항타 분석기로 측정된 압축파의 속도는 3300m/sec까지 감소되었다. 이는 항타로 인해 말뚝에 발생한 잔크랙들이 압축파의 전달을 방해하기 때문으로 판단된다. 따라서 말뚝의 탄성계수는 32%정도 감소한 것으로 나타났다.

그림 1은 말뚝에 손상이 생기기 직전과 직후의 항타를 말뚝 항타 분석기로 관찰한 것이다. 205타(그림 1.(a))에서의 항타기록은 흙의 저항으로 인해 말뚝에 작용하는 힘은 증가하고 속도는 감소하는 정상적인 항타를 나타내고 있다. 그러나 207타(그림 1.(b))와 214타(그림 1.(c))의 항타기록은 말뚝의 속도가 말뚝 중간부근에서 급격히 증가하는 반면 힘은 상대적으로 감소함을 보이고 있으며, 말뚝 항타 분석기는 말뚝의 손상을 알리는 Blinking Line과 함께 말뚝의 손상위치와 말뚝의 손상정도를 보여주고 있다. 말뚝 건전도 지수 Beta는 말뚝의 손상정도를 나타내는 지수이며 대략적으로 말뚝의 원래 단면에 대한 손상되지 않은 단면의 비율이다. Beta가 1~0.8이면 약간 손상, 0.6~0.8이면 손상, 0.6이하이면 말뚝이 완전히

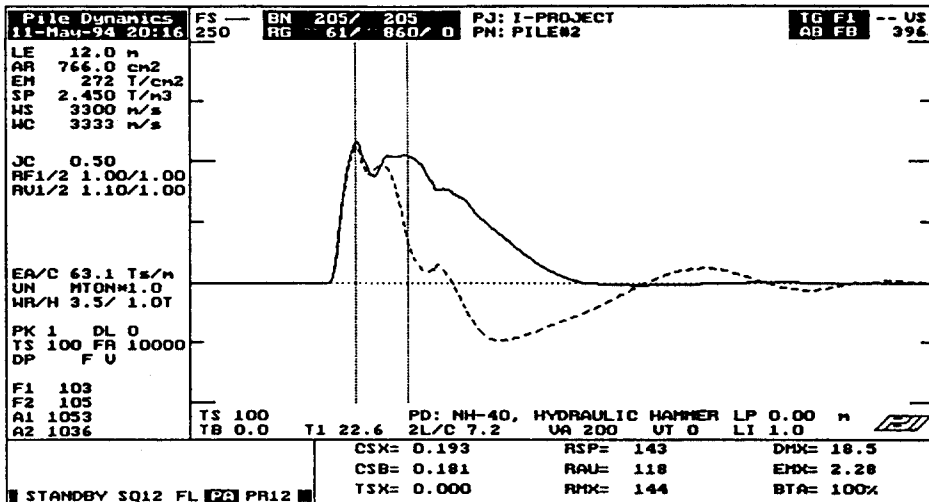
절단된 것으로 판단한다. (Rausche 등, 1978)

207타와 214타의 항타기록을 비교하면 말뚝의 손상정도는 악화되고 있으나 말뚝 선단 부근에 작용하는 힘은 증가하고 이로 인해 말뚝 선단에서의 압축 응력(CSB)이 증가하였음을 관찰할 수 있다. 그러므로 손상된 말뚝이 계속되는 항타로 인해 다시 접촉하면서 항타에너지를 선단부로 전달함을 알 수 있다. 이들 항타시 램의 낙하고는 1.14m였으므로 본 항타 시스템의 에너지 전달률은 55~56%이다. 동일 현장에서 깨끗이 두부정리된 말뚝을 동일한 낙하고로 재항타하면서 측정된 에너지 전달률이 73~74%였다. 이로부터 말뚝의 두부를 파손시키면서 항타하는 경우 전달 에너지중 일부가 두부의 파손에 소모되므로 실제로 말뚝의 관입에 소요되는 에너지는 말뚝 두부가 손상되지

않는 상태의 항타와 비교하여 상당히 적은 것으로 추정된다. 특히 두부가 손상되면서 항타하는 경우 항타관리를 위해 측정된 최종관입량은 과소평가되어 동적 지지력 공식을 이용하여 추정된 말뚝의 지지력이 과대 평가될 수 있음에 유의하여야 한다.

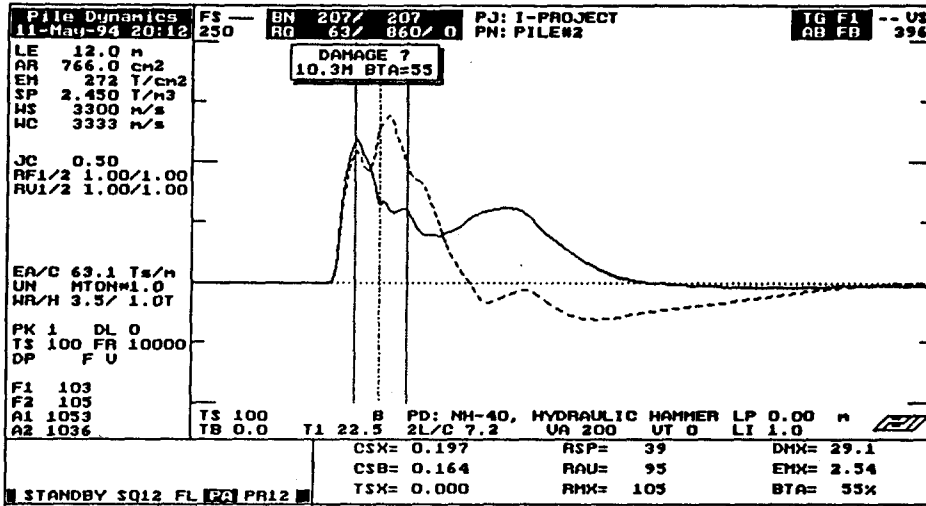
## 2) P 현장

본 현장의 지반은 깊이 2.3~3.1m까지는 매립층으로서 실트질 모래 및 자갈, 잡석 등으로 구성되어있으며, 그 밑으로 12.5~15.5m의 깊이까지는 풍화토층이, 깊이 22.3~22.5m까지는 풍화암층이 존재하고 있고 그 아래로 연암층이 있다. 말뚝은 외경이 35.0cm이고, 두께가 6.5cm인 PC 말뚝으로 SIP 공법으로 시공되었으며, 최종관입깊이는 9.9m이다. 지지력 추정

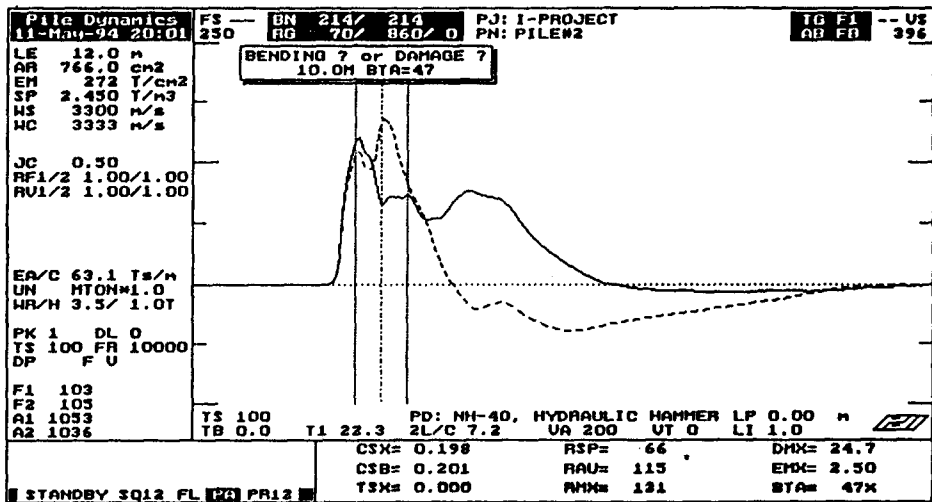


(a)

그림 1. 말뚝 항타 분석기의 화면(계속)



(b)



(c)

그림 1. 말뚝 향타 분석기의 화면

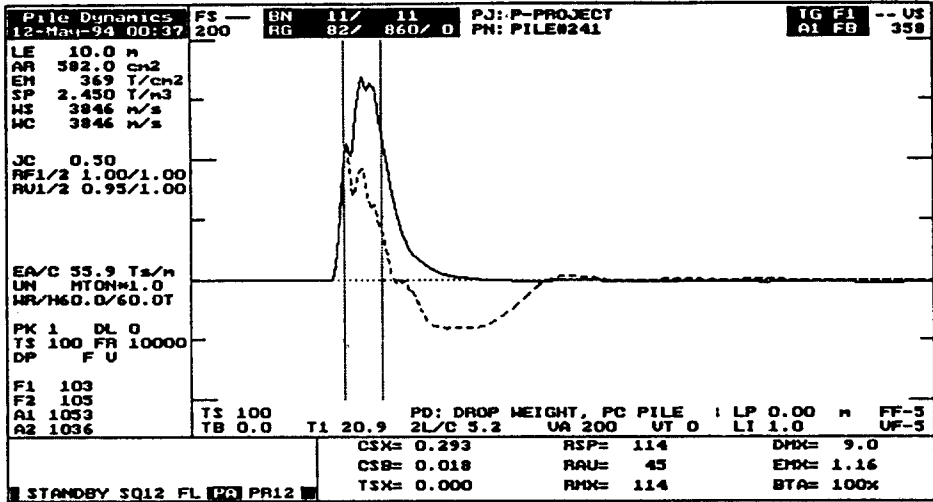


그림 2. 말뚝 향타 분석기의 화면

을 위하여 말뚝이 완전히 양생된 후 약 3톤 무게의 낙하추를 이용하여 재향타를 실시하였으며 낙하고는 말뚝에 작용하는 응력을 관찰하면서 서서히 증가시켰다. 시험시 2개의 가속도계 중 한개가 느슨해져 나머지 하나의 가속도계만 사용하여 시험을 수행하였다.

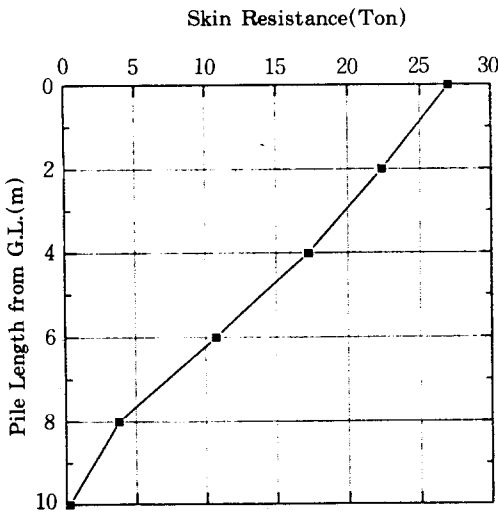


그림 3. 주면 마찰력 분포

그림 2에 나타난 바와 같이 Impact까지는 Proportionality가 성립하고 시간  $t_1$ 부터 F와 V의 간격이 크게 벌어진체 시간  $t_2$ 까지 그 간격을 유지하는 것으로 보아 말뚝의 두부쪽에서 상당히 큰 주면 마찰력이 작용하고 말뚝 선단 부쪽으로 내려감에 따라 점차로 주면 마찰력이 작아지는 것을 알 수 있으며, 그림 3의 CAPWAP 해석 결과도 그러한 양상을 보여주고 있다.

이 현장의 말뚝은 주면 마찰력이 전체 지지력의 약 85%를 차지하므로 SIP 공법에 의하여 시공되는 말뚝은 마찰 말뚝에 가까움을 알 수 있다. 말뚝 향타 분석기 및 CAPWAP에 의한 지지력 해석결과는 표 2와 같다. 재향타시 말뚝의 소성 변위가 거의 발생하지 않았으므로 해석결과는 과소평가된 것으로 판단된다. 이 현장에서 시험한 10개 말뚝의 해석결과에 의하면 대부분의 SIP 말뚝은 주면 마찰이 전체 지지력의 최소 80% 이상을 차지하며 시공관리 정도에 따라 주면 마찰력의 크기는 상당히 변화함을 알 수 있었다.

그러나 SIP 공법으로 시공된 말뚝은 말뚝 주면에 고착된 시멘트 Paste들로 인해 말뚝의

정확한 단면적 및 탄성계수 추정에 어려움이 있으므로 본 해석시에는 PC말뚝의 Impedance를 수정없이 사용하였다. 또한 SIP 공법 특성상 흙-말뚝간의 정적 및 동적 저항 모델이 적절치 않고 Radiation Damping에 의한 항타 에너지 소산 등에 관한 고려가 필요하므로, 앞으로 SIP 공법에 의한 시공 말뚝에 관한 말뚝 항타 분석기 적용에 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

### 3) H 현장

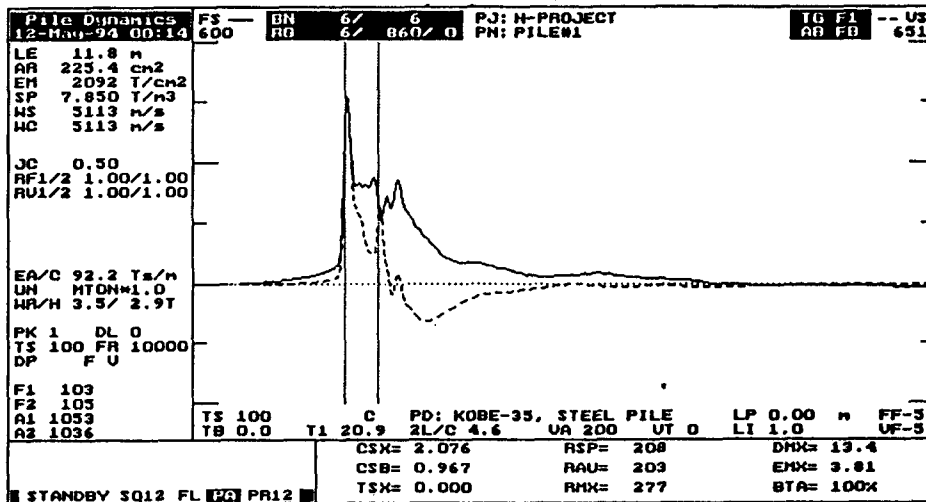
본 현장은 철도교량의 피어를 지지하기 위하여 설계하중 140Ton의 개단 강관 말뚝을 시공하는 현장이다. 강관 말뚝은 외경이 60.96cm, 두께는 1.2cm이었다. 지반은 0~0.5m까지 세

립내지 조립의 모래섞인 실트층, 0.5~4.0m까지 자갈 및 실트섞인 세립내지 조립의 모래층, 4.0~6.0m까지는 실트 및 세립내지 조립의 모래섞인 자갈층, 6.0~16.6m까지는 실트 섞인 세립내지 조립의 모래층, 16.6~25.8m까지는 실트 섞인 세립내지 조립의 모래 및 암편으로 분해된 풍화암층이 있으며, 그 아래로 연암층이 존재하고 있다. 항타기는 디젤(K-35)햄머가 사용되었고, 11.4m 관입 후 변형계와 가속도계를 부착하고 말뚝 항타 분석기로 측정하면서 최종관입깊이 11.64m까지 항타하였다.

그림 4.(a)에 보이는 바와 같이 t2에서 말뚝에 작용하는 힘은 감소하고 속도는 증가하므로 아직까지 말뚝이 지지층에 관입되지 못하였음을 알 수 있으며 말뚝두부의 최대 압축응력은

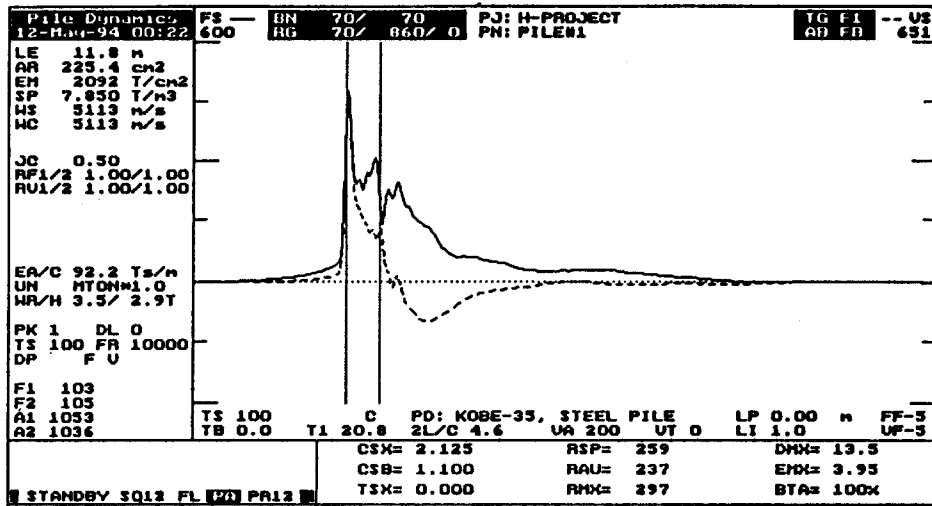
표 2 말뚝 항타 분석기 해석 결과

최 종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	Jc	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반 정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake (mm)	
			Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe
1.2	0.5	114	66.8	12.1	78.9	0.823	0.394	0.680	1.801	3.170	5.170



(a)

그림4 말뚝 항타 분석기의 화면(계속)



(b)

그림 4. 말뚝 향타 분석기의 화면

2.076T/cm<sup>2</sup>로 강관의 항복응력 2.8T/cm<sup>2</sup> 보다 적으므로 과잉 향타 응력은 걸리지 않고 있다. 70타에서의 향타기록인 그림 4.(b)도 t2에서의 상태가 그림 4.(a)와 비슷하며 예상 지지력은 약간 증가한 259Ton 정도로 실제하중 140Ton과 비교하여 안전율이 2.0에 미달하고 있다.

말뚝 향타 분석기로 측정하기 시작한 11.4m 관입시부터 70타를 향타 후 11.64m까지 관입 되었으므로 평균관입량은 약 3.43mm이고 최종 10타의 평균관입량은 약 3.38mm였다. 그러므로 말뚝은 3.3~3.4mm/blow로 계속 관입되는 양상이며 실제하중의 3배에 해당하는 지지력을 얻기 위해서는 상당량의 향타가 계속되어야 한다. 따라서 좀 더 큰 용량의 향타기를 사용한다면 좀 더 효율적인 향타가 이루어질 것이다. 본 현장에서 사용된 향타기의 에너지 전달률은 약 36~37%로, 디젤 향타기로 강관 말뚝을 향타하는 경우의 일반적인 평균 에너지 전달률 34.9% (PDI, 1993)와 비슷한 것으로 나타났다.

그림 5는 CAPWAP 해석으로 추정된 재하 시험 곡선과 정적 재하 시험으로 측정된 하중-

변위 곡선을 비교한 것으로 하중 220Ton까지의 두 곡선이 거의 완벽하게 일치하고 있으나 220Ton 이상의 하중에서는 큰 차이를 보이고 있다. 그러나 표 3에 나타나 있듯이 Case 방법, CAPWAP 방법, 정적 재하 시험으로 측정 또는 추정된 극한 지지력이 각각 259 Ton, 268.2 Ton, 230~280 Ton으로 크게 차이가 나지는 않고 있다.

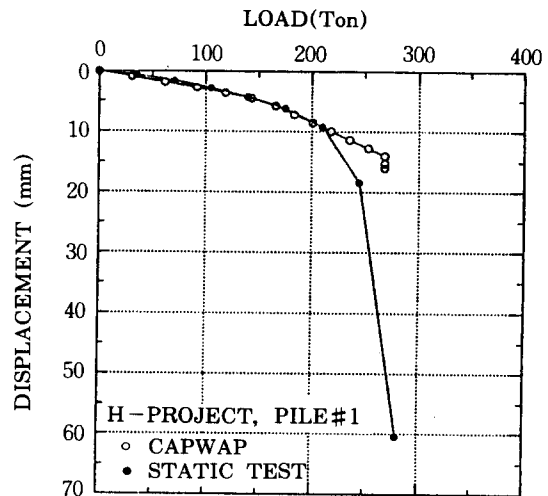


그림 5. CAPWAP 방법과 정적 재하 시험의 하중-변위 곡선

표 3 해석 결과

최 종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	Jc	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반 정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake (mm)	
Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe			
3.38	0.5	259	123.2	145.1	268.2	0.610	0.373	0.456	0.237	2.032	7.913

4) D 현장

본 현장은 외경 60.96cm, 두께 1.2cm의 개단 강관 말뚝이 피어를 지지하도록 시공하는 현장으로 말뚝의 설계하중은 140Ton이다. 지반은 깊이 1m 정도까지는 매립층으로 실트섞인 중립 내지 세립 모래 자갈, 깊이 9.6m까지는 풍화토층으로 보통 조립 내지 조밀, 실트섞인 세립 내지 중립모래, 깊이 16.8m 정도까지는 풍화암층으로 매우 조밀, 실트섞인 조립 내지 중립 모래, 그 이하로는 연암층으로 균열이 심한 약한 강도의 풍화 편마암으로 구성되어 있다. 항타기는 Kobe-35가 사용되었으며 말뚝을 6.15m까지 관입시키고 변형계와 가속도계를 부착한 후 말뚝 항타 분석기로 관찰하면서 6.28m까지 관입하였다. 130mm를 추가로 관입하는데 72타를 항타하였으므로 평균관입량은 1.8mm 정도이다.

그림 6은 70타째의 항타기록으로 동일한 항타기를 사용한 그림 4와 비교하여 항타시 상당히 완만한 하중의 증가가 관찰되고 있다. 디젤 항타기의 경우 램의 하강시 디젤유의 Pre-compression으로 인해 램의 타격전에 말뚝 두부에 약간의 힘이 전달되며 타격과 동시에 말뚝 두부에서의 힘과 속도는 Proportionality를 유지하며 동시에 급격히 증가하는 것이 보통이다. 본 현장의 항타기는 타격 직전 디젤유의 폭발이 일어나는 Preignition 현상때문에 램이 Impact Block을 타격하지 못한 상태에서 상승하여 항타 에너지가 충분히 말뚝에 전달되지 않고 있다.

본 현장의 항타시 측정된 기록중 72타 짜만 Preignition이 일어나지 않았으며 이때의 최대 전달 에너지는 3.96Ton-m(에너지 전달률 약 37.7%)이고 나머지 항타시의 최대 전달 에너지

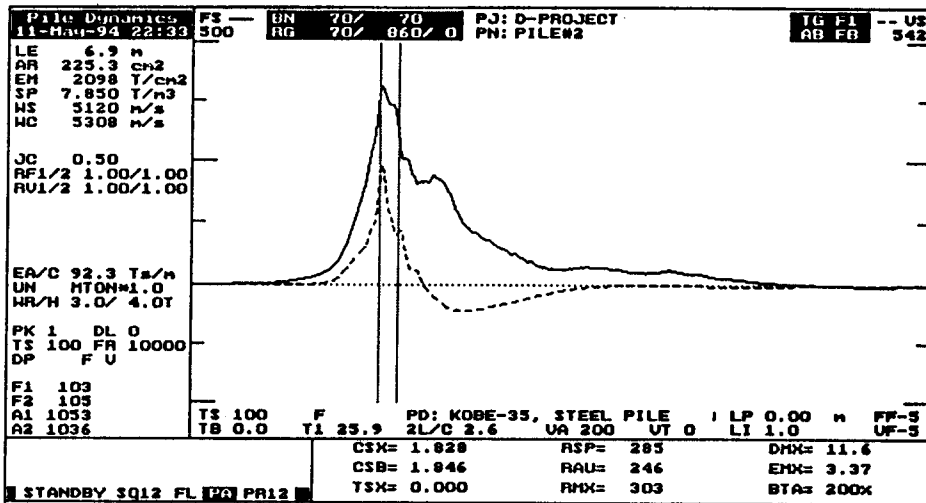


그림 6. 말뚝 항타 분석기의 화면

지는 3.1~3.37 Ton·m(에너지 전달률 29.5~32.1%)였다.

위의 관찰 결과로부터 항타기가 적절히 작동하지 않는 상태에서 측정된 최종 관입량을 이용하여 항타관리를 하는 경우 상당한 문제가 야기될 수 있음을 알 수 있다.

### 5) J 현장

본 현장은 교량의 피어를 지지하기 위한 말뚝을 시공하는 현장으로 외경 50.8cm, 두께

1.2cm의 개단 강관 말뚝이 사용되었으며 말뚝 1본당 설계하중은 80Ton이다. 지반은 심도 0~4.0m는 모래질 점토, 4.0~9.8m는 점토질 모래, 9.8~10.5m는 자갈, 10.5~15.0m는 점토질 모래, 15.0~19.5m는 실트질 모래로 구성된 풍화암층으로 구성되어 있다. 약 7~8m 정도를 터파기를 하고 말뚝을 항타하였으므로, 말뚝이 점토질 모래층과 완전 풍화토층의 경계부분까지 관입된 것으로 판단된다.

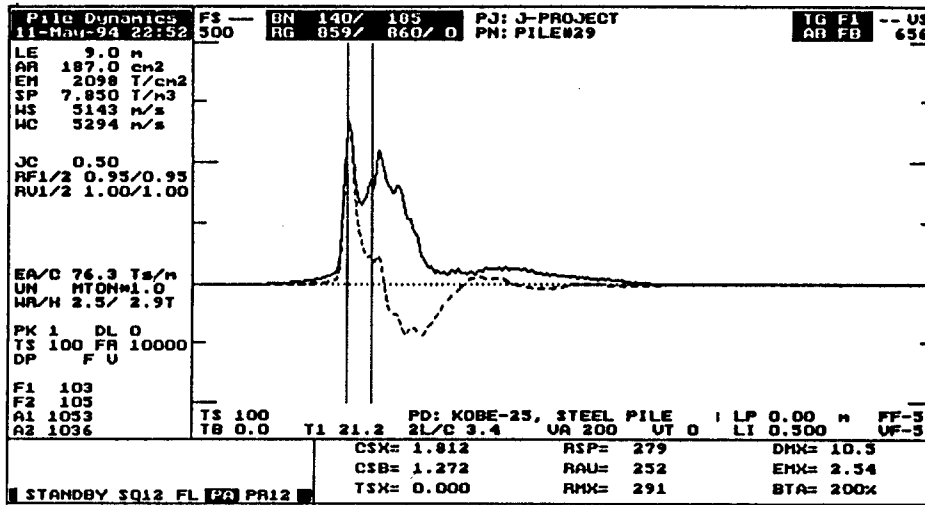


그림 7. 말뚝 항타 분석기의 화면

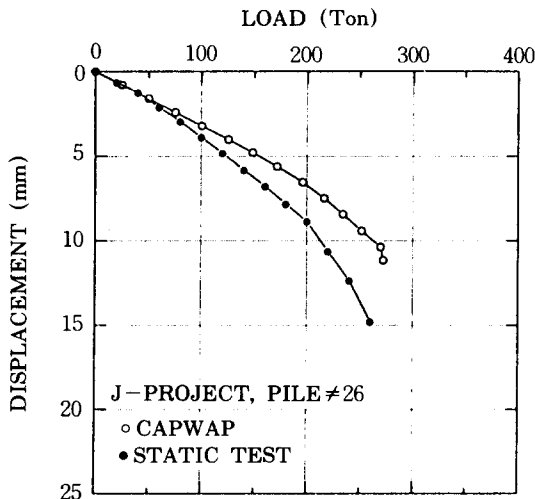


그림 8. CAPWAP 방법과 정적 재하 시험의 하중-변위 곡선

항타기는 디젤(Kobe-25)해머가 사용되었으며 초기 항타부터 말뚝 항타 분석기로 관찰하면서 6.8m까지 말뚝을 관입시켰다. 6.8m 관입되는 동안 약 1400타가 항타되었으며 최종관입시 항타기의 램은 약 3.2m까지 뛰었으며 마지막 10타의 평균관입량은 1.7mm/blow였다. 그림 7은 최종관입시의 항타기록으로 Case 방법에 의한 예상 극한 지지력은 279톤이며 최대 전달 에너지는 2.54 ton·m임을 알 수 있다. 이로부터 항타시스템의 에너지 전달률은 약 32% 정도였음을 알 수 있다.

이들 관찰결과로부터 항타기는 적절히 작동하고 있으나 충분한 지지력을 얻기 위한 깊이까지 관입시키기 위해서는 과도한 항타(1400타 이상)가 요구되며 말뚝의 최대 압축 응력은



말뚝 자체의 항복 응력보다 충분히 적으므로 효율적인 항타를 위해 좀 더 큰 용량의 항타기가 적절함을 알 수 있다. 정적 재하 시험은 항타 3일 후에 실시되었으며 그림 8은 CAPWAP과 정적 재하 시험의 하중-변위 곡선을

비교한 것이다. 정적 재하 시험 결과는 최종 재하 단계까지 뚜렷한 파괴점이 나타나지 않았으므로 CAPWAP결과와 직접 비교가 어렵지만 전반적으로 비슷한 양상을 보이고 있다. 표 4는 그림 7의 기록을 분석한 결과이다.

표 4 항타분석기 및 CAPWAP 해석 결과

최 종 관입량 (mm/bl)	Case Method		CAPWAP Method								
	J <sub>c</sub>	극한 지지력	극한 지지력 (Ton)			지반 정수					
						Case Damping		Smith Damping		Quake (mm)	
			Skin	Toe	Total	Skin	Toe	Skin	Toe	Skin	Toe
1.7	0.5	279	124.5	147.9	272.3	1.196	0.274	0.740	0.142	2.538	4.706

### 참 고 문 헌

1. Pile Dynamics, Inc., "PDA-Pile Driving Analyzer," Cleveland, Ohio, 1993.
2. Rausche, F., and Goble, G. G., "Determi-

nation of Pile Damage by Top Measurements," Behavior of Deep Foundations, ASTM Symposium, Boston, Massachusetts, 1978.